

УДК 621.3.027

В.Г. Ягуп, д.т.н., проф.,
М.А. Литвин, инженер,
Д.А. Кузьменко, магистрант
 Харьковская национальная академия
 городского хозяйства, г. Харьков
Е.В. Ягуп, к.т.н.,
Е.Я. Ивакина, инженер
 Харьковская государственная
 академия железнодорожного
 транспорта, г. Харьков

КОМПЕНСАЦИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ТРЕХФАЗНОГО УПРАВЛЯЕМОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ

Проблемы возникновения реактивной мощности в электроэнергетических системах связаны с различными причинами, в том числе с режимами работы трансформаторного и двигательного оборудования, наличием нелинейных полупроводниковых и газоразрядных нагрузок. Особенно наглядно проявляются процессы генерации реактивной мощности в системах с полупроводниковыми преобразователями [1-4]. Последние годы преобразователи электрической энергии получают все более широкое распространение в системах электропитания транспорта, при управлении различного рода электроприводами, установках электрометаллургии [3]. Генерируемая полупроводниковыми преобразователями реактивная мощность, как и в других случаях, вызывает отрицательные эффекты в работе электроэнергетических систем. При этом, в частности, появляются перегрузки по току линий электропередачи, что в свою очередь приводит к увеличению потерь электрической мощности.

Для компенсации реактивной мощности в качестве простейшего схемотехнического решения используются конденсаторные батареи. Работа выпрямителя снабженного компенсирующими конденсаторами, отличается в первую очередь наличием емкостной составляющей, протекающих в проводах питающей сети, а также воздействию напряжений конденсаторов на моменты естественной коммутации неуправляемых вентилях.

Рассмотрим схему управляемого мостового трехфазного выпрямителя (рис.1), содержащего компенсирующие конденсаторы С1-С3, включенные по схеме звезды. В схеме не показан питающий трансформатор, поскольку при идеализации он может быть исключен, если считать единичным коэффициент трансформации. Поэтому результаты анализа будут справедливы независимо от того, на какой стороне трансформатора будут включены конденсаторы. При учете реального трансформатора с неединичным коэффициентом потребуется лишь учесть приведение параметров схемы к какой-либо выбранной стороне трансформатора. Нагрузка R1-L2 носит активно-индуктивный характер. Индуктивность L1 полагаем исчезающе малой и не оказывающей влияния на электромагнитные процессы - она используется при компьютерном моделировании для выявления сетевого тока. С расчетом на моделирование пронумерованы и узлы схемы на рис.1.

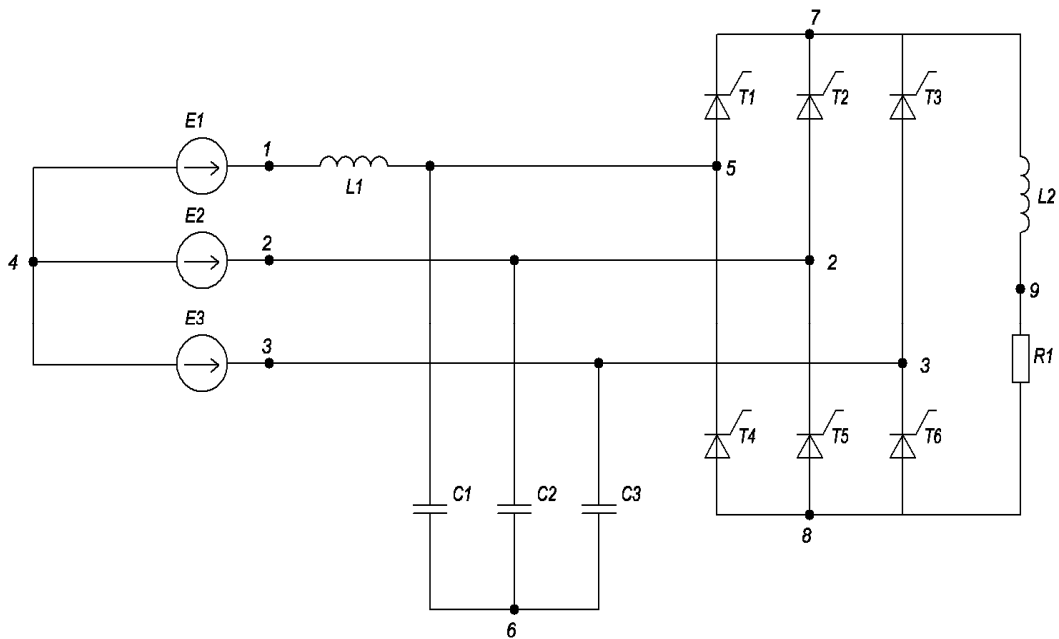


Рис.1. Схема выпрямителя с компенсирующими конденсаторами



Рис.2. Результаты моделирования компенсированного выпрямителя с помощью пакета СИМПАТ

Последующие выкладки проведем с использованием возможностей математического пакета MathCAD.

Амплитуда фазного напряжения, питающего выпрямитель:

$$U_m := 1000$$

Линейное напряжение:

$$U_{ab} := \sqrt{3} \cdot U_m \quad U_{ab} = 1732.05081$$

Количество тактов:

$$m := 6 \quad m = 6$$

Среднее значение выпрямленного напряжения неуправляемого выпрямителя:

$$U_0 := U_{ab} \cdot \frac{m \cdot \sin\left(\frac{\pi}{m}\right)}{\pi} \quad U_0 = 1653.98669$$

Угол управления:

$$a := \frac{\pi}{6} \quad a = 0.5236$$

Выпрямленное напряжение управляемого выпрямителя:

$$U_d := U_0 \cdot \cos(a) \quad U_d = 1432.39449$$

Активное сопротивление нагрузки:

$$R_0 := 100 \quad R_0 = 100$$

Постоянный идеально сглаженный ток нагрузки:

$$I_d := \frac{U_d}{R_0} \quad I_d = 14.32394$$

Активная мощность, потребляемая нагрузкой:

$$P_d := U_d \cdot I_d \quad P_d = 20517.53969$$

Эта мощность равномерно нагружает три фазы питающего напряжения. Поэтому на одну фазу приходится мощность:

$$P_1 := \frac{1}{3} \cdot P_d \quad P_1 = 6839.1799$$

Общая формула для полной мощности, потребляемой выпрямителем от одной фазы А:

$$\frac{1}{\pi} \cdot \int_{\frac{\pi}{6} + \alpha}^{5 \cdot \frac{\pi}{6} + \alpha} I \cdot U \cdot \sin(\Theta) d\Theta \rightarrow \frac{1}{\pi} \cdot I \cdot U \cdot \frac{1}{3} \cdot \cos(\alpha)$$

При $I=I_d$ и $U=U_m$:

$$P_a := \frac{1}{\pi} \cdot I_d \cdot U_m \cdot (\sqrt{3}) \cdot \cos\left(\frac{\pi}{6}\right) \quad P_a = 6839.1799$$

что полностью совпадает с вычисленным значением потребляемой мощности по постоянной составляющей.

Определим гармонические составляющие питающего тока фазы А. Ток в фазе имеет форму прямоугольных импульсов чередующейся полярности, имеющих длительности $(2\pi/3)$ и сдвинутых на угол управления α .

Синусная составляющая:

$$\frac{1}{\pi} \cdot \left[\int_{\frac{\pi}{6} + \alpha}^{5 \cdot \frac{\pi}{6} + \alpha} I \cdot \sin(\Theta) d\Theta + \int_{\frac{7}{6} \cdot \pi + \alpha}^{11 \cdot \frac{\pi}{6} + \alpha} (-I) \cdot \sin(\Theta) d\Theta \right] \rightarrow \frac{2}{\pi} \cdot I \cdot 3^{\frac{1}{2}} \cdot \cos(\alpha)$$

Косинусная составляющая:

Косинусная составляющая определяет потребление реактивной мощности. Амплитуда косинусной составляющей сетевого тока первой гармоники фазы А :

$$\frac{1}{\pi} \cdot \left[\int_{\frac{\pi}{6} + \alpha}^{5 \cdot \frac{\pi}{6} + \alpha} I \cdot \cos(\Theta) d\Theta + \int_{\frac{7}{6} \cdot \pi + \alpha}^{11 \cdot \frac{\pi}{6} + \alpha} (-I) \cdot \cos(\Theta) d\Theta \right] \rightarrow \frac{-2}{\pi} \cdot I \cdot 3^{\frac{1}{2}} \cdot \sin(\alpha)$$

Синусная составляющая определяет потребление активной мощности. Амплитуда синусной составляющей сетевого тока первой гармоники фазы А :

$$I_{am1sin} := \frac{2}{\pi} \cdot I_d \cdot \sqrt{3} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{6}\right) \quad I_{am1sin} = 13.67836$$

Активная мощность, отдаваемая фазой А:

$$P_a := \frac{1}{2} \cdot I_{am1sin} \cdot U_m \quad P_a = 6839.1799$$

Это значение активной мощности совпадает с определенной выше.

Косинусная составляющая определяет потребление реактивной мощности. Амплитуда косинусной составляющей сетевого тока первой гармоники фазы А :

$$I_{am1cos} := \frac{-2}{\pi} \cdot I_d \cdot \sqrt{3} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{6}\right) \quad I_{am1cos} = -7.8972$$

Реактивная мощность, циркулирующая в фазе А:

$$Pr := \frac{1}{2} \cdot I_{am1} \cos \cdot U_m \quad Pr = -3948.60235$$

Для компенсации реактивной мощности необходимо обеспечить в сетевом проводе каждой фазы емкостной протиток с амплитудой $I_{am1} \cos$. Поскольку амплитуда этого тока обеспечивается фазным напряжением амплитудой U_m , то сопротивление емкости должно составлять величину

$$X_c := \frac{U_m}{-I_{am1} \cos} \quad X_c = 126.62708$$

Поскольку питание обеспечивается от сети с частотой $f=50$ Гц, то емкость конденсатора на одну фазу составляет величину:

$$C := \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot X_c} \quad C = 2.514 \times 10^{-5}$$

Для проверки проведем компьютерный эксперимент с использованием пакета имитационного моделирования тиристорных преобразователей СИМПАТ [5]. Диаграмма тока фазы А, полученная с помощью модели приведена на рис.2. Наложение тока компенсирующего конденсатора на прямоугольные импульсы тока собственно выпрямителя позволяет исключить косинусную составляющую первой гармоники сетевого тока.

В пакете СИМПАТ имеется возможность спектрального анализа с помощью быстрого преобразования Фурье. Таблица результатов гармонического анализа показывает практически полную компенсацию реактивной мощности, обусловленной первой гармоникой первичного тока выпрямителя.

Таблица

Номер гармоники	Синусная составляющая	Косинусная составляющая	Амплитуда
0	0.0007738520	0.0000000000	0.0007738520
1	-0.0248041304	13.6627104590	13.6627329745
2	0.0015791050	-0.0000068226	0.0015791197
3	0.0273673063	0.0005396823	0.0273726271
4	0.0015538455	-0.0000015173	0.0015538463
5	1.5825576755	2.8406169974	3.2517062785
6	0.0015569582	-0.0000081307	0.0015569794
7	-1.0859268640	1.8631157774	2.1564873182
8	0.0015608830	-0.0000009297	0.0015608832
9	0.0273704242	0.0015705506	0.0274154473
10	0.0015552444	-0.0000007058	0.0015552446
11	0.7003549223	1.2692316621	1.4496365162
12	0.0015572731	-0.0000040595	0.0015572784
13	-0.6022747681	0.9992999344	1.1667627245
14	0.0015591700	-0.0000004609	0.0015591701
15	0.0273752943	0.0026165172	0.0275000528

Выводы

1. Рассмотрен случай компенсации реактивной мощности, генерируемой трехфазным управляемым тиристорным выпрямителем с помощью конденсаторов, включенных по схеме звезды.
2. Проведены расчеты полной, активной и реактивной мощностей, балансирующих в системе с управляемым выпрямителем. Обоснован выбор компенсирующих конденсаторов с учетом угла управления тиристорами выпрямителя.
3. Аналитические расчеты подтверждаются компьютерными экспериментами помощью системы имитационного моделирования тиристорных преобразователей СИМПАТ.

Литература

1. Маевский О.А. Энергетические показатели вентильных преобразователей.- М.: Энергия, 1978.- 320 с.
2. Мадьяр Л. Коэффициент мощности ($\cos \phi$). - М.-Л.: Госэнергоиздат, 1961.-376 с.
3. Аррилага Дж., Брэдли Д., Боджер П. Гармоники в электрических системах.- М.: Энергоатомиздат, 1990.- 320 с.
4. Каганов И.Л. Электронные и ионные преобразователи.- ч.3.-М.-Л.: Государственное энергетическое издательство, 156.-528 с.
5. Ягуп В.Г. Автоматизированный расчет тиристорных схем.- Харьков: Выща школа, 1986.-160 с.

**КОМПЕНСАЦІЯ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ ТРИФАЗНОГО КЕРОВАНОГО
ВИПРЯМЛЯЧА**

В.Г. Ягуп, М.А. Литвин, Д.А. Кузьменко, Е.В.Ягуп, Е.Я. Ивакина.

Розглянуто конденсаторну компенсацію реактивної потужності керованого трифазного випрямляча.

COMPENSATION OF REACTIVE POWER IN CONTROLLED THREE-PHASE RECTIFIER

V.G. Yagup, M.A. Litvin, D.A. Kuzmenko, K.V. Yagup, K.Y. Ivakina

Capacitor compensation of reactive power in controlled rectifier is considered